



Potensi Stok dan Kapasitas Mitigasi CO₂-e Ekosistem Mangrove di Pesisir Teluk Ambon Dalam, Kota Ambon

(Carbon Stock Potential CO₂-e Mitigation Capacity of Mangrove Ecosystem in the Inner Ambon Bay Coastal Area, Ambon City)

Sadali Ie^{1*}, Alex S. W. Retraubun², Johannes M. S. Tetelepta², Charlothia I. Tupan² & Rahman³

¹Program Doktor Ilmu Kelautan, Pascasarjana, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M.Putuhena, Kampus Poka, Ambon, Maluku, 97233, Indonesia

²Jurusan Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Pattimura, , Jl. Ir. M.Putuhena, Kampus Poka, Ambon, Maluku, 97233, Indonesia

³Jurusan Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Pattimura, , Jl. Ir. M.Putuhena, Kampus Poka, Ambon, Maluku, 97233, Indonesia

Informasi Artikel:

Submission : 14 Februari 2026
Revised : 05 April 2026
Accepted : 09 April 2026
Published : 02 Juni 2026

*Penulis Korespondensi:

Sadali Ie
Program Doktor Ilmu Kelautan,
Pascasarjana, Universitas Pattimura, Jl.
Ir. M.Putuhena, Kampus Poka, Ambon,
Maluku, 97233, Indonesia
e-mail: sadaliie8@gmail.com
Telp: +62 811-4701-222

Makila 20 (1) 2026: 1-16

DOI:
<https://doi.org/10.30598/makila.v20i1.24767>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the
[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Copyright ©2026 Author(s): Sadali Ie, Alex S. W. Retraubun, Johannes M. S. Tetelepta, Charlothia I. Tupan & Rahman
Journal homepage:
<https://ojs3.unpatti.ac.id/index.php/makila>
Journal e-mail: makilajournal@gmail.com

Research Article · [Open Access](#)

ABSTRACT

Mangrove ecosystems are important blue carbon reservoirs with high potential for climate change mitigation; however, site-specific assessments in semi-enclosed tropical bays, particularly in eastern Indonesia, remain limited. This study estimates the carbon stock and CO₂-e sequestration potential of mangrove ecosystems in Inner Ambon Bay. Field data were collected from four sites – Passo, Waiheru, Nania, and Negeri Lama – through measurements of stand structure, biomass, and sediment carbon to a depth of 100 cm. Biomass was estimated using species-specific allometric equations, while sediment carbon was analyzed based on bulk density and organic carbon content. The results show substantial spatial variation, with total carbon stocks ranging from 425.0 to 1,205.0 ton C/ha, highest in Passo and lowest in Negeri Lama. Sediment carbon dominated the total stock, contributing more than 75%, indicating the critical role of belowground pools in long-term carbon storage. The CO₂-e sequestration potential ranged from 1,560.1 to 4,418.1 ton CO₂-e/ha, reflecting strong mitigation capacity. This study provides one of the first integrated, site-specific assessments of aboveground, belowground, and sediment carbon stocks in a semi-enclosed tropical bay in eastern Indonesia, linking spatial variability to ecosystem-based CO₂-e mitigation capacity. These findings highlight the strategic importance of mangrove conservation for climate mitigation and support the development of blue carbon-based management and financing mechanisms.

KEYWORDS: Mangrove ecosystem, blue carbon, carbon stock, CO₂-e sequestration, climate change mitigation

INTISARI

Ekosistem mangrove merupakan penyimpan karbon biru yang penting dengan potensi tinggi dalam mitigasi perubahan iklim; namun, kajian spesifik lokasi pada sistem teluk semi-tertutup di wilayah tropis, khususnya di Indonesia bagian timur, masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi stok

karbon dan potensi penyerapan CO₂-e ekosistem mangrove di Teluk Ambon Dalam. Data lapangan dikumpulkan dari empat lokasi—Passo, Waiheru, Nania, dan Negeri Lama—melalui pengukuran struktur tegakan, biomassa, serta karbon sedimen hingga kedalaman 100 cm. Biomassa diestimasi menggunakan persamaan alometrik spesifik spesies, sedangkan karbon sedimen dianalisis berdasarkan densitas bulk dan kandungan karbon organik. Hasil menunjukkan variasi spasial yang signifikan, dengan stok karbon total berkisar antara 425,0 hingga 1.205,0 ton C/ha, tertinggi di Passo dan terendah di Negeri Lama. Karbon sedimen mendominasi dengan kontribusi lebih dari 75%, menunjukkan peran penting kompartemen bawah permukaan dalam penyimpanan karbon jangka panjang. Potensi penyerapan CO₂-e berkisar antara 1.560,1 hingga 4.418,1 ton CO₂-e/ha, yang mencerminkan kapasitas mitigasi yang tinggi. Penelitian ini merupakan salah satu kajian terintegrasi pertama yang mengestimasi secara spesifik lokasi stok karbon atas, bawah, dan sedimen pada ekosistem mangrove teluk semi-tertutup di Indonesia timur, serta mengaitkan variasi spasial dengan kapasitas mitigasi berbasis ekosistem. Temuan ini menegaskan pentingnya konservasi mangrove dalam mitigasi perubahan iklim serta mendukung pengembangan kebijakan pengelolaan dan mekanisme pembiayaan berbasis karbon biru.

KATA KUNCI : Ekosistem mangrove, karbon biru, stok karbon, serapan karbon, mitigasi perubahan iklim

PENDAHULUAN

Ekosistem mangrove merupakan komponen penting dalam sistem pesisir tropis yang berperan strategis sebagai penyimpan dan penyerap karbon dalam jumlah besar (Murdiyarso *et al.*, 2015). Sebagai bagian dari ekosistem blue carbon, mangrove mampu mengakumulasi karbon dalam biomassa atas, biomassa bawah, dan sedimen selama ratusan hingga ribuan tahun (Donato *et al.*, 2011). Kapasitas ini menjadikan mangrove sebagai salah satu ekosistem paling efektif dalam mitigasi perubahan iklim, terutama ketika stok karbon dinyatakan dalam satuan karbon dioksida ekuivalen (CO₂-e) untuk merepresentasikan kontribusinya terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca.

Secara global, Indonesia memiliki sekitar 3,1 juta hektar mangrove atau setara dengan 23% dari total mangrove dunia dan 59% di Asia Tenggara (Rahman *et al.*, 2024a). Potensi ini memberikan kontribusi signifikan terhadap stok karbon global, dengan kemampuan penyimpanan karbon mangrove Indonesia yang dilaporkan dua hingga empat kali lebih tinggi dibandingkan hutan tropis daratan (Alongi, 2014). Dalam konteks kebijakan iklim, konversi stok karbon menjadi CO₂-e merupakan indikator kunci dalam pengembangan mekanisme mitigasi berbasis alam, termasuk perdagangan karbon dan skema pembayaran jasa lingkungan.

Pada skala lokal, kawasan pesisir Teluk Ambon Dalam merupakan sistem teluk semi-tertutup dengan karakteristik hidrologi dan geomorfologi yang mendukung akumulasi karbon. Suplai

nutrien dari aliran sungai serta dinamika pasang surut menciptakan kondisi yang optimal bagi pertumbuhan mangrove dan penyimpanan karbon, khususnya pada sedimen. Namun demikian, tekanan antropogenik seperti ekspansi permukiman, aktivitas perikanan, dan pembangunan infrastruktur pesisir berpotensi mengganggu struktur dan fungsi ekosistem mangrove di kawasan ini.

Sejumlah penelitian sebelumnya di Ambon telah mengkaji aspek biodiversitas (Natan *et al.*, 2023), tutupan kanopi (Pietersz *et al.*, 2024), serta kualitas perairan dan emisi gas rumah kaca (Lilitnuhu *et al.*, 2024; Kesaulya *et al.*, 2023; Kesaulya & Rahman, 2023). Namun, kajian yang secara terintegrasi mengkuantifikasi stok karbon mangrove (biomassa atas, bawah, dan sedimen) serta mengonversinya ke dalam satuan CO₂-e pada skala tapak di Teluk Ambon Dalam masih sangat terbatas.

Keterbatasan ini menunjukkan adanya *research gap* yang signifikan, terutama dalam menghubungkan potensi stok karbon dengan kapasitas mitigasi berbasis ekosistem yang relevan untuk kebutuhan inventarisasi karbon daerah dan implementasi kebijakan iklim. Padahal, besaran stok karbon dan nilai CO₂-e sangat dipengaruhi oleh faktor biofisik seperti komposisi spesies, diameter pohon, biomassa akar, kandungan karbon sedimen, dan dinamika hidrologi (Kauffman & Donato, 2012), yang menyebabkan variasi spasial yang tinggi antar lokasi.

Urgensi penelitian ini semakin meningkat dalam konteks komitmen Indonesia terhadap penurunan emisi melalui *Nationally Determined Contribution* (NDC), di mana mangrove menjadi salah satu pilar utama dalam strategi mitigasi berbasis alam. Informasi kuantitatif mengenai stok karbon dan CO₂-e pada skala lokal sangat diperlukan untuk mendukung integrasi ekosistem mangrove dalam kebijakan pengelolaan pesisir, pengembangan pasar karbon, serta skema pembiayaan lingkungan berbasis blue carbon.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi stok karbon mangrove serta kapasitas mitigasi CO₂-e di pesisir Teluk Ambon Dalam melalui pendekatan terintegrasi yang mencakup biomassa atas, biomassa bawah, dan karbon sedimen. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam mendukung pengelolaan mangrove berbasis ekosistem serta memperkuat kontribusi kawasan pesisir Ambon dalam mitigasi perubahan iklim pada tingkat lokal maupun nasional.

METODE PENELITIAN

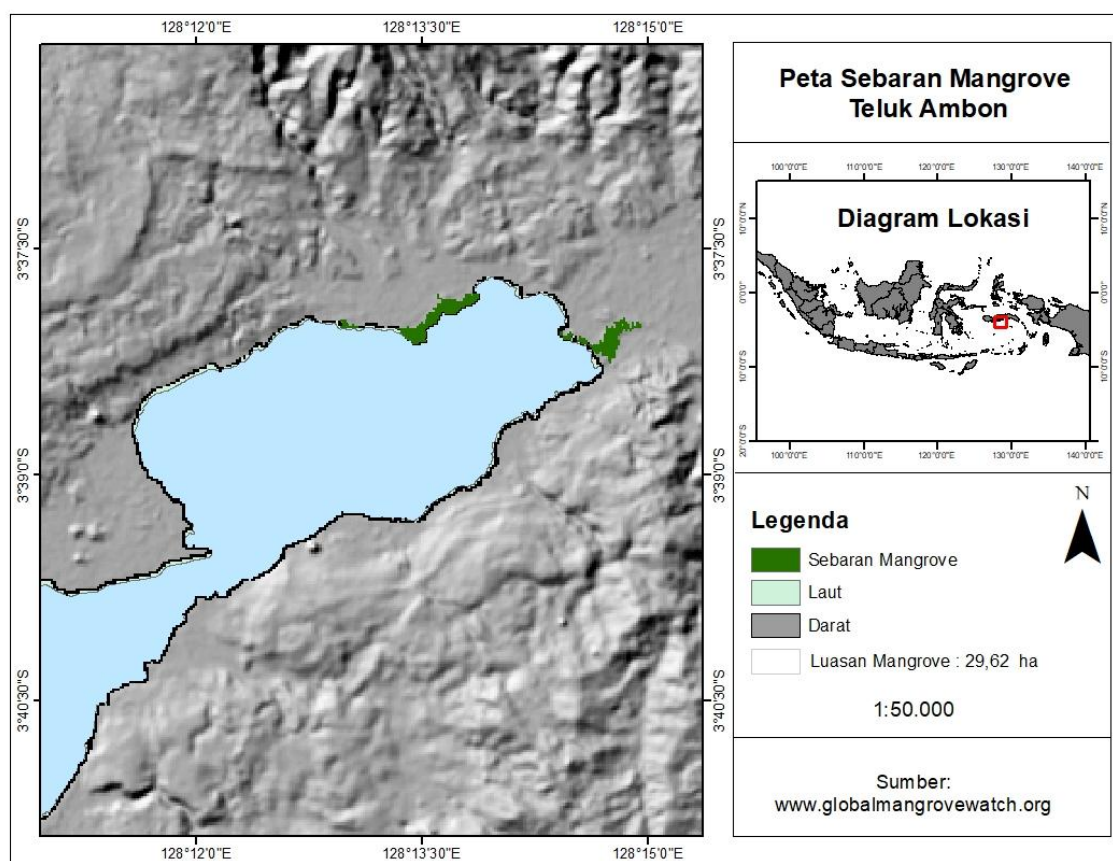
Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus–September 2025 di ekosistem mangrove pesisir Teluk Ambon Dalam (**Gambar 1**). Teluk Ambon Dalam merupakan kawasan semi-tertutup dengan dinamika pasang surut dan masukan air tawar yang mendukung pembentukan sedimen halus, kondisi yang umum bagi perkembangan mangrove. Sebagai teluk dengan perairan relatif

tenang, area ini memiliki potensi tinggi dalam akumulasi karbon organik pada biomassa maupun sedimen (Donato *et al.*, 2011).

Lokasi penelitian mencakup empat area utama mangrove, yaitu Passo, Waiheru, Negeri Lama, dan Nania. Keempat lokasi ini memiliki karakter biofisik yang berbeda, mulai dari kawasan yang dipengaruhi aktivitas pemukiman hingga area dengan tutupan mangrove yang lebih rapat. Variasi kondisi tersebut penting karena struktur vegetasi, jenis substrat, dan tingkat gangguan antropogenik diketahui memengaruhi besarnya stok karbon mangrove (Kauffman & Donato, 2012; Friess *et al.*, 2019).

Keberagaman karakter ekologis dari empat lokasi tersebut memberikan representasi komprehensif mengenai kondisi mangrove Teluk Ambon Dalam, sekaligus relevan untuk mengkaji perbedaan potensi penyimpanan karbon dan kapasitas mitigasi CO₂-e antar lokasi.



Gambar 1. Peta Sebaran Mangrove Teluk Ambon Dalam, Kota Ambon

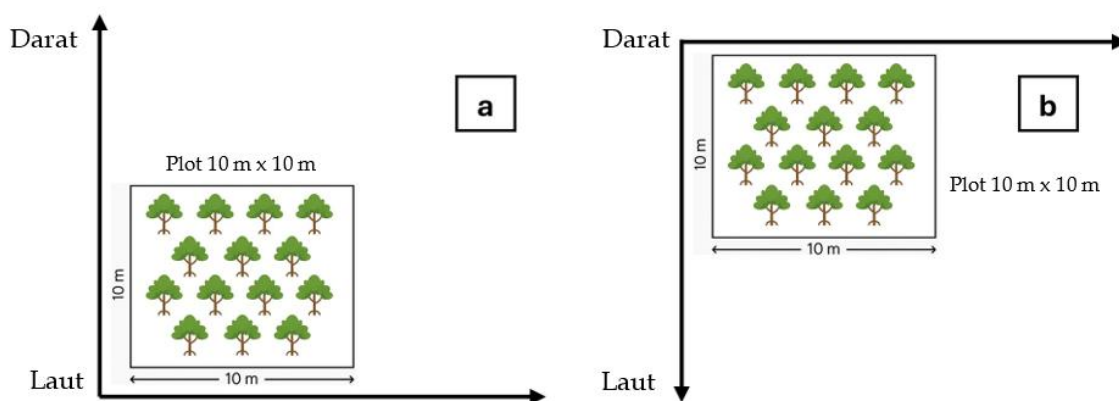
Metode Pengumpulan Data

Kerapatan Mangrove

Pengambilan data kerapatan mangrove dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode transek kuadran dengan ukuran plot 10 × 10 meter (Bengen *et al.*, 2022). Jumlah plot yang digunakan sebanyak 65 plot yang terdiri dari 30 plot di Passo, 20 plot di Waiheru, 8 plot di Nania, dan 7 plot di Negeri Lama. Plot didistribusikan pada berbagai zona hutan mangrove (zona depan,

tengah, dan belakang) guna memastikan keterwakilan variasi struktur tegakan dan kondisi biofisik ekosistem. Penempatan plot dilakukan dengan metode stratifikasi acak (*stratified random sampling*), sehingga setiap zona ekologis mangrove memiliki peluang yang seimbang untuk terpilih.

Penempatan plot sampling dilakukan berdasarkan kondisi aktual lapangan dengan mempertimbangkan bentuk morfologi pesisir dan pola zonasi mangrove pada lokasi penelitian. Orientasi transek dapat mengikuti gradien dari daratan menuju perairan atau sebaliknya, sesuai karakteristik masing-masing lokasi. Strategi ini digunakan untuk meningkatkan keterwakilan data terhadap variasi komposisi dan struktur vegetasi mangrove yang ada. Desain peletakan plot penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Ilustrasi peletakan plot pengamatan mangrove berbasis transek kuadrat (10 m × 10 m) pada dua arah pengambilan data, yaitu (a) dari laut ke darat dan (b) dari darat ke laut, untuk merepresentasikan variasi zonasi ekosistem mangrove.

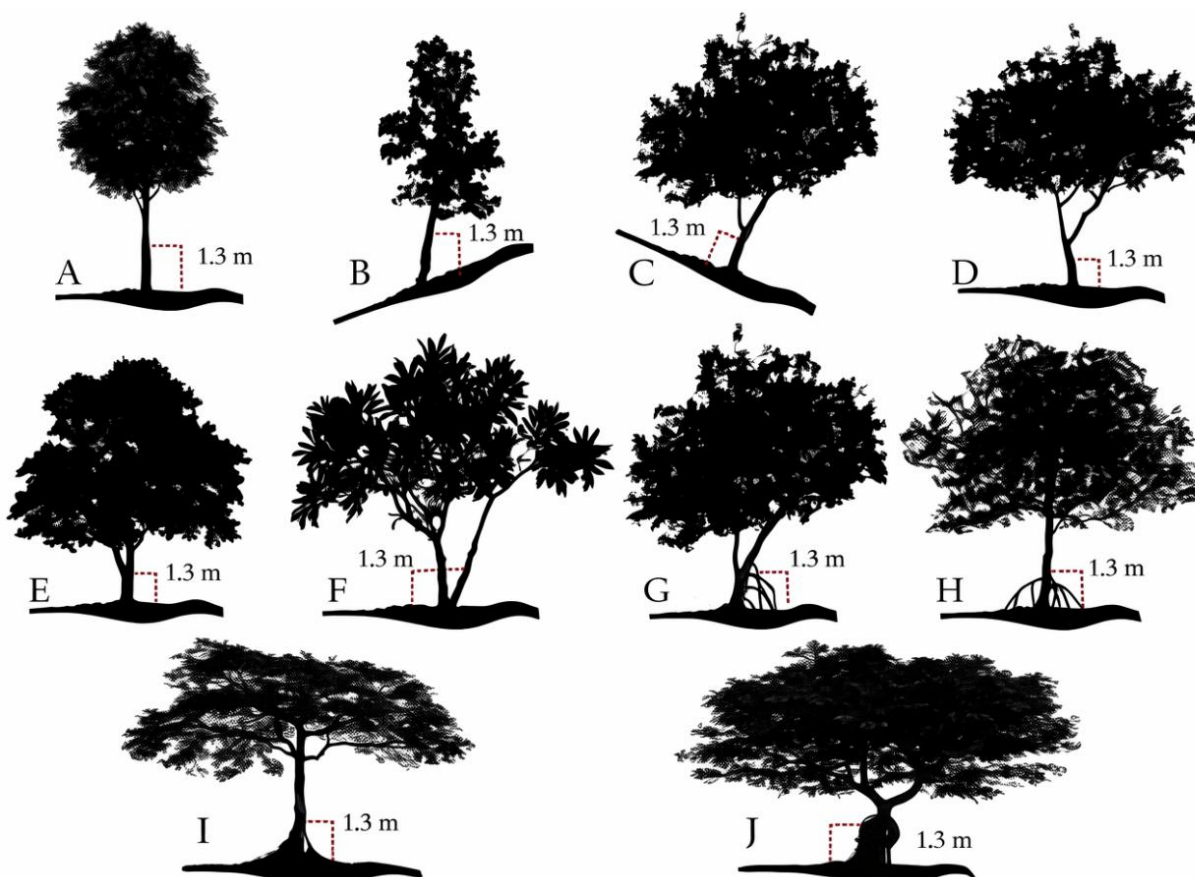
Pengamatan pada setiap plot meliputi identifikasi spesies dan pencacahan individu pohon mangrove. Penentuan spesies dilakukan melalui pendekatan morfologi dengan memperhatikan karakter akar, daun, bunga, dan buah berdasarkan referensi Noor *et al.* (2006). Selanjutnya, individu yang memiliki diameter batang melebihi 5 cm ($D > 5$ cm) dikategorikan sebagai tegakan pohon sesuai klasifikasi yang digunakan oleh Rahman *et al.* (2024b).

Pengukuran Biomassa Mangrove

Biomassa ekosistem mangrove yang diukur meliputi biomassa permukaan (AGB) atas dan biomassa permukaan bawah (BGB). Kedua biomassa diukur melalui pendekatan diameter pohon setinggi dada (DBH). Data diameter batang diperoleh melalui pengukuran seluruh tegakan pohon yang berada dalam plot sampling. Pengukuran dilakukan berdasarkan standar yang direkomendasikan oleh Komiyama *et al.* (2005) dan Bengen *et al.* (2022). Untuk pohon mangrove dengan tinggi melebihi 2 m, diameter dicatat pada posisi DBH (*diameter at breast height*), yaitu 130 cm di atas permukaan tanah. Detail prosedur pengukuran ditampilkan pada **Gambar 3**. Adapun pada individu dengan tinggi kurang dari 2 m, diameter batang diukur pada ketinggian 50 cm dari permukaan tanah dan dinyatakan sebagai trunk diameter (TD = 50 cm).

Sementara itu, pengambilan sampel sedimen dilakukan dengan menggunakan *sediment core* (diameter 6 cm, panjang 100 cm) pada interval kedalaman 0–15 cm, 15–30 cm, 30–50 cm, dan 50–100 cm (Kauffman et al., 2012). Pada setiap interval kedalaman, sub-sampel sedimen diambil dengan ketebalan tetap sebesar 5 cm (bukan seluruh ketebalan interval), yang digunakan untuk analisis *bulk density* dan karbon organik sedimen dengan metode pengeringan dan pengabuan (*Loss on Ignition*, LOI) (Sasmito et al., 2020). Perhitungan volume sampel didasarkan pada dimensi silinder dengan tinggi sampel 5 cm sesuai ketebalan sub-sampel yang dianalisis. Total sampel sedimen yang diperoleh adalah 432 sampel, terdiri atas 196 sampel dari Negeri Passo, 132 sampel dari Waiheru, 64 sampel dari Nania, dan 60 sampel dari Negeri Lama.

Jumlah sampel tersebut dipilih untuk memastikan keterwakilan spasial dan vertikal dalam mengukur kapasitas penyimpanan karbon sedimen mangrove. Distribusi titik pengamatan yang merata di tiap zona memungkinkan identifikasi variasi alami yang dipengaruhi oleh posisi geomorfologi maupun intensitas aktivitas manusia.



Gambar 3. Metode Pengukuran Diameter Batang Mangrove pada posisi 1,3 m dari permukaan tanah berdasarkan variasi bentuk batang, kemiringan pohon, dan kondisi permukaan substrat. Keterangan: (a) Pohon kondisi normal, DBH diukur pada ketinggian 1,3 m dari permukaan tanah.

(b) Pohon kondisi normal di lahan miring, DBH diukur pada ketinggian 1,3 m dari permukaan tanah tertinggi. (c) Pohon miring di lahan miring, DBH diukur pada ketinggian 1,3 m secara tegak lurus terhadap permukaan tanah. (d) Pohon bercabang dengan tinggi percabangan > 1,3 m, DBH diukur pada ketinggian 1,3 m dari permukaan tanah. (e) Pohon bercabang pada ketinggian 1,3 m, DBH diukur tepat di bawah percabangan yang masih normal. (f) Pohon bercabang dengan tinggi percabangan < 1,3 m, DBH diukur pada masing-masing cabang pada ketinggian 1,3 m dan dianggap sebagai batang yang berbeda. (g) Pohon miring

di tanah datar, DBH diukur pada ketinggian 1,3 m secara tegak lurus terhadap permukaan tanah. (h) Pohon dengan akar tunjang > 1,3 m, DBH diukur pada ketinggian 1,3 m di atas puncak akar tunjang. (i) Pohon dengan tinggi genangan > 1,3 m, DBH diukur pada ketinggian 20 cm di atas batas genangan. (j) Pohon dengan cacat batang (menggembung) pada ketinggian 1,3 m, DBH diukur pada ketinggian 20 cm di atas bagian yang cacat.

Analisis Data

Kerapatan Mangrove

Analisis kerapatan (K) dan kerapatan jenis mangrove (K_i) dilakukan dengan mengacu pada persamaan menurut (Bengen *et al.*, 2020) yaitu sebagai berikut:

$$K = \frac{N}{A}; \quad \text{dan} \quad K_i = \frac{\sum ni}{A} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan: K menunjukkan kerapatan total (tegakan ha⁻¹); K_i merupakan kerapatan spesies ke-*i* (tegakan ha⁻¹); N adalah jumlah seluruh tegakan pohon yang tercatat dalam plot kuadrat; *ni* menyatakan jumlah individu dari spesies ke-*i* pada plot kuadrat; sedangkan A merupakan luas plot pengamatan yang dinyatakan dalam satuan hektar (ha).

Biomassa, Stok Karbon, dan Kapasitas Mitigasi CO₂-e

Perhitungan biomassa mangrove dilakukan menggunakan model allometrik yang dikembangkan dan divalidasi oleh peneliti sebelumnya (**Tabel 1**). Untuk setiap spesies, persamaan yang digunakan dipilih berdasarkan performa statistik terbaik, yang tercermin dari nilai koefisien korelasi (*r*) tertinggi di antara berbagai model yang tersedia dalam referensi. Kriteria tersebut diterapkan pada estimasi biomassa di atas permukaan tanah (*above-ground biomass*) maupun biomassa bawah permukaan tanah (*below-ground biomass*).

Tabel 1. Persamaan allometrik pendugaan biomassa mangrove

No.	Spesies	Biomassa permukaan atas (AGB)	Biomassa permukaan bawah (BGB)
1	<i>A. marina</i>	B = 0.308D^{2.11} Comley dan McGuinness (2005)	B = 1.28D^{1.17} Comley dan McGuinness (2005)
2	<i>S. alba</i>	B = 0.258D^{2.287} Kusmana <i>et al.</i> (2018)	B = 0.230 ρ (D²H)^{0.74} Kusmana <i>et al.</i> (2018)
3	<i>R. apiculata</i>	B = 0.235D^{2.42} Ong <i>et al.</i> (2004)	B = 0.0689D^{2.61} Ong <i>et al.</i> (2004)
4	<i>R. mucronata</i>	B = 0.128D^{2.60} Fromard <i>et al.</i> (1998)	B = 0.0974 (D²H)^{1.05} Tamai <i>et al.</i> (1986)
5	<i>R. stylosa</i>	B = 0.178D^{2.59} Gevana dan IM. (2016)	B = 0.261D^{1.86} Comley dan McGuinness (2005)
6	<i>X. granatum</i>	B = 0.0823D^{2.59} Clough dan Scott (1989)	B = 0.145D^{2.55} Poungparn <i>et al.</i> (2002)
7	Persamaan umum*	B = 0.251 ρ (D)^{2.46} Komiya <i>et al.</i> (2005)	B = 0.199 ρ^{0.899} D^{2.22} Komiya <i>et al.</i> (2005)

Keterangan: B = Biomass, D = dbh (130 cm); ρ = massa jenis (mg/cm³) yang diacu dalam db.worldagroforestry.org/; H = D/(0.02D + 0.678) (Tamai *et al.* 1986); *Persamaan umum digunakan ketika spesies mangrove yang ditemukan belum memiliki persamaan allometrik.

Nilai stok karbon tegakan mangrove dihitung dengan mengonversi biomassa menjadi kandungan karbon menggunakan faktor fraksi karbon. Dalam penelitian ini digunakan nilai fraksi karbon sebesar 46,82% untuk genus *Bruguiera*, *Rhizophora*, dan *Sonneratia* sebagaimana dilaporkan oleh Rahman *et al.* (2023). Dengan demikian, estimasi stok karbon tegakan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Stok Karbon Tegakan (kg C/tegakan)} = \text{Biomassa tegakan} \times 0,4682 \dots\dots\dots (2)$$

Selanjutnya, kapasitas mitigasi emisi CO₂-ekuivalen (CO₂-e) ditentukan melalui konversi stok karbon menjadi CO₂ berdasarkan rasio massa molekul karbon dioksida (44) terhadap massa atom karbon (12). Persamaan yang digunakan untuk menghitung kapasitas mitigasi CO₂-e adalah sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas Mitigasi CO}_2\text{-e} = \text{Stok Karbon} \times 3,67 \dots\dots\dots (3)$$

Sementara itu, data sedimen mangrove yang diperoleh pada tiap interval kedalaman dianalisis untuk mengetahui *bulk density* (BD), karbon organik (%C), hingga estimasi stok karbon total pada sedimen. Tahapan analisis dilakukan secara berurutan, dimulai dari penghitungan *bulk density*, konversi bahan organik menjadi karbon organik, perhitungan konsentrasi karbon organik sedimen (SOC), hingga estimasi stok karbon per satuan luas (Mg C ha⁻¹).

Langkah pertama adalah menghitung *bulk density* (BD), yaitu bobot kering sedimen per satuan volume. Sampel sedimen yang telah dikeringkan pada suhu 105 °C ditimbang, kemudian hasilnya dibagi dengan volume sampel. Karena alat yang digunakan adalah *Peat Auger* berdiameter 6 cm dengan panjang sampel 10 cm, maka volume silinder sampel dihitung dengan rumus $V = \pi r^2 h$, 282,6 cm³. Dengan demikian, *bulk density* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$BD = \frac{W_{dry}}{V} \dots\dots\dots (4)$$

dimana W_{dry} adalah berat kering sampel (g), dan V adalah volume sampel (cm³).

Tahap berikutnya adalah menentukan kandungan karbon organik dalam sedimen. Analisis ini dilakukan dengan metode *Loss on Ignition* (LOI), yaitu dengan membakar sedimen pada suhu 550 °C setelah sebelumnya dikeringkan pada 105 °C. Selisih berat sebelum dan sesudah pembakaran menunjukkan kandungan bahan organik (%OM) dalam sampel, yang dihitung dengan rumus:

$$\%OM = \frac{W_{105} - W_{550}}{W_{105}} \times 100 \dots\dots\dots (5)$$

Kandungan bahan organik tersebut kemudian dikonversi menjadi karbon organik menggunakan faktor konversi (CF) sebesar 0,58, sehingga kandungan karbon organik (%C) dapat dihitung sebagai:

$$\%C = \%OM \times CF \dots\dots\dots (6)$$

Selanjutnya, konsentrasi karbon organik dalam sedimen (*Soil Organic Carbon* / SOC) ditentukan dengan mengalikan nilai *bulk density* dengan persen karbon organik:

$$SOC = BD \times \frac{\%C}{100} \dots\dots\dots (7)$$

Nilai SOC ini menyatakan kandungan karbon organik sedimen dalam satuan g cm⁻³. Untuk mengubahnya menjadi stok karbon sedimen pada setiap lapisan kedalaman, nilai SOC dikalikan

dengan ketebalan lapisan (d, cm) dan disesuaikan dengan konversi satuan luas per hektar. Persamaan yang digunakan adalah:

$$C_{stock} \text{ (MgC/ha)} = SOC \times d \times 100 \dots\dots\dots (8)$$

Terakhir, stok karbon total sedimen pada tiap titik pengamatan dihitung dengan menjumlahkan stok karbon dari seluruh lapisan kedalaman (0–15 cm, 15–30 cm, 30–50 cm, dan 50–100 cm). Sementara serapan karbon dihitung dari ekivalensi CO₂e, yaitu total stok karbon dikalikan dengan 3,67.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kerapatan Mangrove

Berdasarkan **Tabel 2**, kerapatan mangrove pada kategori pohon di Teluk Ambon Dalam, Kota Ambon menunjukkan variasi spasial yang cukup jelas antar lokasi penelitian, dengan nilai tertinggi di Passo (943 tegakan ha⁻¹), diikuti Waiheru (793 tegakan ha⁻¹), Negeri Lama (550 tegakan ha⁻¹), dan Nania (455 tegakan ha⁻¹). Perbedaan ini mengindikasikan adanya variasi struktur tegakan yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokal dan tingkat tekanan antropogenik.

Secara ekologis, variasi kerapatan tersebut mencerminkan perbedaan dalam proses rekrutmen, pertumbuhan, dan mortalitas yang dipengaruhi oleh faktor hidrodinamika, karakteristik substrat, serta intensitas gangguan. Lokasi dengan kerapatan tinggi seperti Passo dan Waiheru diduga memiliki kondisi lingkungan yang lebih mendukung pertumbuhan mangrove, seperti suplai sedimen yang stabil dan gangguan antropogenik yang relatif lebih rendah dibandingkan lokasi lainnya.

Temuan ini sejalan dengan berbagai studi mangrove tropis yang menunjukkan bahwa kerapatan tegakan cenderung lebih tinggi pada lokasi dengan kondisi lingkungan yang stabil dan tekanan antropogenik yang rendah, sementara penurunan kerapatan sering dikaitkan dengan degradasi habitat dan konversi lahan (misalnya Alongi, 2009; Duke et al., 2007). Implikasinya, lokasi dengan kerapatan rendah seperti Nania dan Negeri Lama memerlukan perhatian dalam pengelolaan, khususnya melalui upaya rehabilitasi dan pengendalian aktivitas yang berpotensi merusak ekosistem mangrove, agar fungsi ekologisnya dapat dipulihkan secara optimal.

Secara komposisi spesies, kerapatan pohon didominasi oleh *Sonneratia alba* dan *Rhizophora mucronata* di seluruh lokasi. *S. alba* menunjukkan kerapatan tertinggi di Negeri Lama (450 tegakan ha⁻¹) dan Passo (296 tegakan ha⁻¹). Dominasi *S. alba* secara ekologis mengindikasikan karakter habitat yang dipengaruhi oleh energi gelombang dan dinamika perairan yang relatif tinggi. Spesies ini dikenal adaptif terhadap substrat labil dan kondisi pesisir terbuka, sehingga berperan penting dalam stabilisasi sedimen dan tahap awal suksesi mangrove. Hasil ini konsisten dengan laporan

sebelumnya yang menyebutkan bahwa *S. alba* umumnya mendominasi zona depan mangrove pada wilayah tropis dengan paparan hidrodinamika tinggi (Tomlinson, 1986; Alongi, 2009). Dari sisi pengelolaan, dominasi *S. alba* menunjukkan bahwa pendekatan rehabilitasi di lokasi-lokasi tersebut perlu mempertimbangkan kesesuaian zonasi ekologis, dengan memprioritaskan spesies yang toleran terhadap kondisi terbuka dan dinamis.

Tabel 2. Kerapatan Mangrove di Teluk Ambon Dalam, Kota Ambon (tegakan ha⁻¹)

Spesies	Waiheru	Nania	Negeri Lama	Passo
<i>Aegiceras corniculatum</i>	20	–	–	46
<i>Avicennia officinalis</i>	6	–	–	–
<i>Bruguiera cylindrica</i>	96	–	19	112
<i>Rhizophora apiculata</i>	150	–	–	87
<i>Rhizophora mucronata</i>	226	255	81	357
<i>Rhizophora stylosa</i>	27	–	–	–
<i>Sonneratia alba</i>	201	135	450	296
<i>Xylocarpus moluccensis</i>	67	65	–	45
Total	793	455	550	943

Sumber: Hasil Pengolahan Data Primer, 2025

Rhizophora mucronata juga menunjukkan kerapatan tinggi, khususnya di Passo (357 tegakan ha⁻¹) dan Nania (255 tegakan ha⁻¹). Secara ekologis, dominasi *R. mucronata* mencerminkan kondisi substrat berlumpur yang relatif stabil dengan pengaruh pasang surut yang mendukung pertumbuhan optimal. Sistem akar tunjangnya berkontribusi dalam meningkatkan stabilitas sedimen dan menciptakan mikrohabitat yang mendukung akumulasi bahan organik. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian yang menyebutkan bahwa genus *Rhizophora* umumnya mendominasi zona tengah mangrove dengan kondisi hidrologi yang lebih terlindungi (Duke *et al.*, 1998; Kathiresan & Bingham, 2001). Implikasi pengelolaan menunjukkan bahwa keberadaan *R. mucronata* penting dalam menjaga stabilitas ekosistem, sehingga perlindungan terhadap tegakan dewasa perlu menjadi prioritas dalam strategi konservasi.

Sebaliknya, spesies seperti *Aegiceras corniculatum*, *Avicennia officinalis*, dan *Rhizophora stylosa* hanya ditemukan di Waiheru dengan kerapatan rendah. Secara ekologis, keterbatasan distribusi ini mengindikasikan adanya batasan habitat atau tekanan tertentu yang menghambat perkembangan spesies tersebut di lokasi lain, baik karena faktor lingkungan maupun gangguan antropogenik. Fenomena ini juga dilaporkan dalam studi lain yang menunjukkan bahwa distribusi spesies mangrove sangat dipengaruhi oleh niche ekologis spesifik serta tingkat gangguan manusia (Alongi, 2009; Duke *et al.*, 2007). Implikasinya, diperlukan pendekatan pengelolaan berbasis keanekaragaman spesies (*biodiversity-based management*), dengan mempertimbangkan perlindungan spesies minor agar tidak mengalami penurunan lebih lanjut.

Keberadaan *Bruguiera cylindrica* dan *Xylocarpus moluccensis* dengan kerapatan sedang hingga rendah ditemukan di beberapa lokasi. Secara ekologis, kedua spesies ini berperan sebagai komponen tambahan yang meningkatkan kompleksitas struktur tegakan dan keanekaragaman habitat. Variasi kerapatannya mencerminkan heterogenitas mikrohabitat yang terbentuk oleh variasi salinitas,

sedimen, dan genangan. Hal ini sesuai dengan konsep bahwa keanekaragaman struktural mangrove berkontribusi terhadap peningkatan resiliensi ekosistem terhadap gangguan lingkungan (Alongi, 2008). Dari perspektif pengelolaan, keberadaan spesies non-dominan ini penting untuk dipertahankan karena berkontribusi terhadap stabilitas jangka panjang dan fungsi ekosistem mangrove secara keseluruhan.

Biomassa Mangrove

Data biomassa mangrove pada empat lokasi di pesisir Passo, Waiheru, Nania, dan Negeri Lama menunjukkan variasi spasial yang cukup mencolok. Biomassa atas permukaan (*above-ground biomass*, AGB) berkisar antara 83,47–310,14 Mg ha⁻¹, sedangkan biomassa bawah permukaan (*below-ground biomass*, BGB) berkisar 41,06–86,07 Mg ha⁻¹. Rata-rata keseluruhan mencapai 211,80 Mg ha⁻¹ (AGB) dan 67,69 Mg ha⁻¹ (BGB) (**Tabel 3**), mencerminkan kondisi ekosistem mangrove yang masih cukup produktif di Teluk Ambon Dalam.

Lokasi Passo mencatat nilai biomassa tertinggi, baik AGB (310,14 Mg ha⁻¹) maupun BGB (86,07 Mg ha⁻¹). Tingginya nilai ini diduga terkait dengan kerapatan tegakan, dominasi pohon berukuran besar, serta kondisi lingkungan yang relatif stabil. Studi-studi sebelumnya menegaskan bahwa struktur tegakan, umur pohon, dan tingkat gangguan merupakan faktor utama penentu biomassa (Alongi, 2014). Dengan demikian, Passo dapat dikategorikan sebagai kawasan dengan kondisi ekologis lebih baik dibandingkan lokasi lainnya

Tabel 3. Potensi biomassa tegakan mangrove pada empat lokasi di Teluk Ambon Dalam (Mg ha⁻¹)

Lokasi	Biomassa atas permukaan (AGB) (Mg ha ⁻¹)	Biomassa bawah permukaan (BGB) (Mg ha ⁻¹)	Total biomassa (Mg ha ⁻¹)
Passo	310,14	86,07	396,21
Waiheru	167,46	64,81	232,27
Nania	286,14	78,82	364,96
Negeri Lama	83,47	41,06	124,53
Rerata	211,8025	67,69	279,49

Sumber: Hasil Pengolahan Data Primer, 2025

Sebaliknya, Negeri Lama menunjukkan biomassa paling rendah, yakni 83,47 Mg ha⁻¹ untuk AGB dan 41,06 Mg ha⁻¹ untuk BGB. Nilai yang rendah ini sering kali dikaitkan dengan tekanan antropogenik seperti penebangan, pengambilan kayu bakar, atau perubahan fungsi lahan (Rahman *et al.*, 2020; 2024d). Penurunan biomassa di daerah dengan tekanan tinggi telah dilaporkan dalam studi mangrove di Asia Tenggara, di mana gangguan dapat menurunkan stok karbon dan meningkatkan emisi CO₂ sebesar 2263,42 Mg CO₂-e ha⁻¹ (Rahman *et al.*, 2024a).

Lokasi Waiheru dan Nania menempati posisi biomassa menengah. Waiheru memiliki AGB sebesar 167,46 Mg ha⁻¹, sedangkan Nania lebih tinggi dengan 286,14 Mg ha⁻¹. Perbedaan ini menunjukkan adanya variasi dalam komposisi spesies, diameter batang, serta kondisi hidrologi antar stasiun. Menurut Komiyama *et al.* (2005), perbedaan kecil dalam struktur tegakan dapat menghasilkan variasi biomassa yang signifikan.

Jika dibandingkan dengan mangrove di Waai, nilai biomassa yang diperoleh pada Negeri Passo, Waiheru, dan Nania jauh lebih besar. Studi di Waai menunjukkan biomassa tegakan sebesar 156,39 Mg ha⁻¹ (total biomassa) pada komunitas yang didominasi *Sonneratia alba* (Rahman *et al.*, 2024e). Namun, nilai biomassa di Negeri Lama (124,53 Mg ha⁻¹) lebih rendah dibandingkan dengan mangrove di Negeri Waai. Sementara itu, potensi biomassa di Teluk Ambon lebih rendah jika dibandingkan dengan Pantai Hitapory dengan nilai 706,41 Mg ha⁻¹ yang secara signifikan dikontribusikan oleh *S. alba* (Ombi *et al.*, 2025). Perbedaan tersebut disebabkan oleh ukuran DBH *S. alba* pada pantai Hitapory rata-rata mencapai 35,53 cm.

Variasi antara lokasi menunjukkan bahwa faktor hidrologi lokal, salinitas, stabilitas substrat, serta frekuensi pasang surut sangat memengaruhi produksi biomassa. Mangrove dengan suplai air tawar yang cukup, nutrisi stabil, dan sedimen berlumpur umumnya menghasilkan biomassa yang lebih tinggi (Alongi, 2015). Hal ini terlihat jelas pada Passo dan Nania. Selain faktor biofisik, tekanan antropogenik seperti konversi lahan dan aktivitas rumah tangga turut mempengaruhi biomassa. Lokasi seperti Negeri Lama yang dekat permukiman cenderung mengalami penurunan biomassa akibat degradasi. Fenomena ini juga dilaporkan di banyak daerah pesisir Indonesia, termasuk Sulawesi, Jawa, dan Papua (Rahman *et al.*, 2024d).

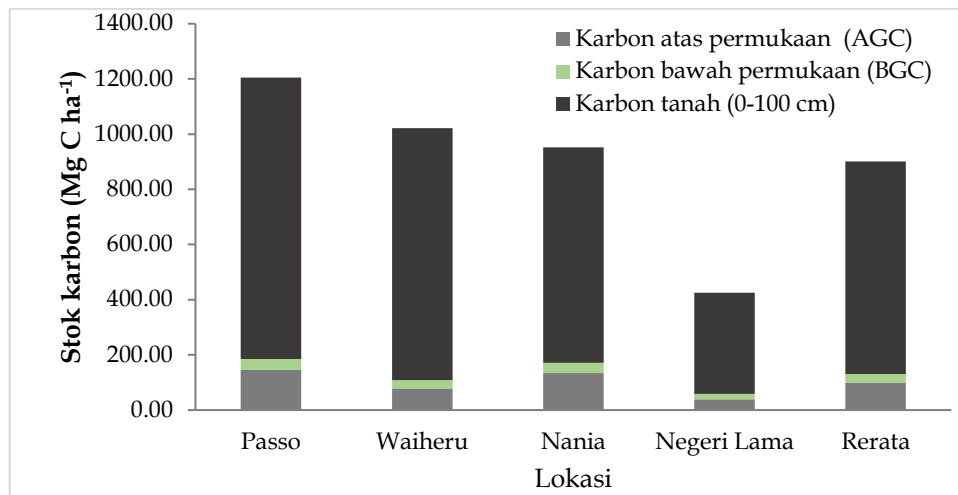
Perbandingan AGB dan BGB pada seluruh lokasi menunjukkan pola proporsional yang umum ditemukan pada ekosistem mangrove, di mana BGB umumnya berkisar 20–35% dari AGB. Pola ini sesuai dengan temuan global Komiyama *et al.* (2008) yang menyatakan bahwa akar mangrove memiliki kontribusi signifikan terhadap penyimpanan karbon tanah, terutama pada ekosistem dengan dominasi *Rhizophora*.

Stok Karbon dan Potensi Mitigasi CO₂-e

Hasil estimasi stok karbon mangrove di Kota Ambon menunjukkan variasi yang signifikan antar lokasi. Stok karbon permukaan atas (AGC) tertinggi ditemukan di Passo (145,21 Mg C ha⁻¹), diikuti Nania (133,97 Mg C ha⁻¹), sementara Negeri Lama paling rendah (39,08 Mg C ha⁻¹). Stok karbon permukaan bawah (BGC) menunjukkan tren serupa, dengan Passo tertinggi (40,30 Mg C ha⁻¹) dan Negeri Lama terendah (19,22 Mg C ha⁻¹). Karbon tanah (SOC) menunjukkan variasi yang relatif lebih kecil dibandingkan komponen biomassa, tetapi tetap memperlihatkan pola dominansi yang sama antar lokasi dengan Passo tetap tertinggi (1.019,43 Mg C ha⁻¹) dan Negeri Lama terendah (367,18 Mg C ha⁻¹) (Gambar 4). Perbedaan ini mencerminkan variasi struktur vegetasi, dominansi spesies besar seperti *Sonneratia alba* dan *Rhizophora mucronata*, serta ketebalan dan karakteristik tanah yang memengaruhi akumulasi karbon jangka panjang (Alongi, 2014; Meng *et al.*, 2021).

Berdasarkan nilai stok karbon tersebut, maka nilai CO₂-e menunjukkan potensi mitigasi karbon yang besar. Passo memiliki total potensi 4.418,1 Mg CO₂-e ha⁻¹, dengan kontribusi dominan dari karbon tanah (3.737,91 Mg CO₂-e ha⁻¹), sedangkan AGC dan BGC masing-masing 532,43 Mg CO₂-e ha⁻¹ dan 147,76 Mg CO₂-e ha⁻¹. Waiheru memiliki total potensi mitigasi karbon sebesar 3.745,12 Mg CO₂-e ha⁻¹, meskipun AGC lebih rendah (287,48 Mg CO₂-e ha⁻¹), tetapi stok sedimen

yang tinggi (3.346,38 Mg CO₂-e ha⁻¹) tetap mendominasi kontribusi total. Nania menunjukkan total 3.491,82 Mg CO₂-e ha⁻¹, dengan distribusi lebih seimbang antara AGC, BGC, dan sedimen, sementara Negeri Lama, dengan stok karbon paling rendah, hanya memiliki total 1.560,12 Mg CO₂-e ha⁻¹ (Tabel 4).



Gambar 4. Potensi stok karbon ekosistem mangrove di Teluk Ambon Dalam, Kota Ambon

Distribusi potensi CO₂-e ini menegaskan bahwa karbon tanah merupakan komponen utama dalam penyimpanan dan mitigasi karbon mangrove, sedangkan AGC dan BGC memperkuat kapasitas tegakan sebagai komponen mitigasi karbon jangka pendek hingga menengah. Rata-rata potensi seluruh lokasi mencapai 3.303,8 Mg CO₂-e ha⁻¹, dengan kontribusi dominan dari karbon tanah (2.823,98 Mg CO₂-e ha⁻¹).

Temuan ini memberikan bukti empiris bahwa ekosistem mangrove di Teluk Ambon Dalam memiliki kapasitas mitigasi perubahan iklim yang tinggi, terutama melalui mekanisme penyimpanan karbon jangka panjang pada sedimen. Dominasi karbon tanah menunjukkan bahwa gangguan terhadap lapisan sedimen berpotensi melepaskan emisi karbon dalam jumlah besar, sehingga aspek perlindungan tanah menjadi krusial dalam strategi mitigasi. Selain itu, variasi spasial yang kuat antar lokasi – dengan nilai tertinggi di Passo dan Waiheru serta terendah di Negeri Lama – menunjukkan adanya perbedaan kondisi ekologis dan tekanan antropogenik yang secara langsung memengaruhi kapasitas penyimpanan karbon. Hal ini menegaskan bahwa pengelolaan mangrove tidak dapat dilakukan secara seragam, melainkan memerlukan pendekatan berbasis lokasi (*site-specific management*).

Hasil ini memberikan dasar ilmiah bagi prioritas pengelolaan mangrove Kota Ambon, yaitu mempertahankan tegakan dengan stok karbon tinggi seperti Passo dan Waiheru untuk mengamankan kapasitas mitigasi CO₂-e, serta merehabilitasi lokasi terdegradasi seperti Negeri Lama untuk meningkatkan kontribusi ekologis dan karbon ekuivalen. Dengan demikian, mangrove Teluk Ambon Dalam tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan karbon, tetapi juga sebagai aset

strategis dalam mendukung kebijakan mitigasi perubahan iklim berbasis ekosistem dan pengembangan skema karbon biru di tingkat lokal.

Tabel 4. Potensi mitigasi karbon ekuivalen (CO₂-e) ekosistem mangrove di Teluk Ambon Dalam, Kota Ambon (Mg CO₂-e ha⁻¹)

Lokasi	Atas permukaan	Bawah permukaan	Tanah (0-100 cm)	Total
Passo	532,43	147,76	3.737,91	4.418,1
Waiheru	287,48	111,26	3.346,38	3.745,12
Nania	491,23	135,31	2.865,28	3.491,82
Negeri Lama	143,30	70,49	1.346,33	1.560,12
Rerata	363,61	116,21	2.823,98	3.303,80

Sumber: Hasil Pengolahan Data Primer, 2025

KESIMPULAN

Temuan penelitian ini mengungkapkan bahwa ekosistem mangrove pada kawasan pesisir Teluk Ambon Dalam memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang tinggi, dengan total stok karbon mencapai hingga 1.205,0 Mg C ha⁻¹ dan potensi mitigasi sebesar 4.418,1 Mg CO₂-e ha⁻¹ pada lokasi dengan kondisi terbaik. Karbon tanah merupakan komponen dominan dengan kontribusi lebih dari 75% terhadap total stok karbon, yang menegaskan peran ekosistem ini sebagai penyimpan karbon biru (*blue carbon reservoir*) dengan fungsi penyimpanan karbon jangka panjang yang signifikan. Variasi spasial antar lokasi menunjukkan bahwa perbedaan kondisi ekologis dan tekanan antropogenik secara langsung memengaruhi kapasitas penyimpanan karbon, sehingga pendekatan pengelolaan berbasis lokasi menjadi penting. Kawasan dengan tegakan yang lebih berkembang memiliki nilai strategis lebih tinggi dalam mendukung mitigasi perubahan iklim dibandingkan area yang terdegradasi.

Implikasi penelitian ini menegaskan bahwa pengelolaan mangrove di Teluk Ambon Dalam perlu diarahkan sebagai bagian dari strategi mitigasi perubahan iklim berbasis ekosistem, melalui perlindungan stok karbon sedimen dan rehabilitasi kawasan terdegradasi. Selain itu, hasil ini memberikan dasar ilmiah untuk penguatan *carbon governance* di tingkat daerah, termasuk integrasi mangrove dalam inventarisasi emisi, pengembangan skema perdagangan karbon, dan implementasi strategi *blue carbon* sebagai bagian dari kebijakan mitigasi iklim. Secara ilmiah, penelitian ini berkontribusi melalui pendekatan terintegrasi dalam mengestimasi stok karbon biomassa dan sedimen serta konversinya ke dalam CO₂-e pada ekosistem teluk semi-tertutup di Indonesia timur, yang sebelumnya masih terbatas. Ke depan, penelitian lanjutan perlu mengkaji dinamika temporal penyimpanan karbon serta integrasi aspek sosial-ekologis untuk mendukung pengelolaan mangrove berbasis lanskap yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim peneliti Universitas Pattimura yang telah membantu proses pengambilan data selama pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6, 195-219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Alongi, D.M. (2015). The impact of climate change on mangrove forests. *Curr Clim Change Rep*, 1, 30-39. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0002-x>
- Bengen., Yonvitner., & Rahman. (2022). *Pedoman Teknis Pengenalan dan Pengelolaan Ekosistem Mangrove*. Bogor: IPB Press. 76p
- Clough, B. F., & Scott, K. (1989). Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. *Forest Ecology and Management*, 27, 117-127. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(89\)90034-0](https://doi.org/10.1016/0378-1127(89)90034-0)
- Comley, B. W. T., & McGuinness, K. A. (2005). Above- and below-ground biomass, and allometry of four common northern Australian mangroves. *Australia Journal Botany*, 53, 431 - 436. <https://doi.org/10.1071/BT04162>
- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5), 293-297. <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>
- Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., ... & Shi, S. (2019). The state of the world's mangrove forests: Past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 89-115. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>
- Fromard, F., Puig, H., Mougin, E., Betoulle, J. L., & Cadamuro, L. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. *Oecologia*. 39-53. <https://doi.org/10.1007/s004420050489>
- Gevana, D. T., & IM, S. (2016). Allometric models for *Rhizophora stylosa* Griff. In dense monoculture plantation in the Philippines. *The Malaysian Forester*, 79(1 & 2), 39 - 53.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kauffman, J. B., & Donato, D. C. (2012). Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. CIFOR.
- Kesaulya, I., Rahman., Haumahu, S., & Krisye. (2023). Global warming potential of carbon dioxide and methane emission from mangrove sediment in Waiheru Coastal, Ambon Bay. *IOP Conference Series*, 1207, 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1207/1/012030>
- Kesaulya, I., & Rahman. (2023). Global warming potential of nitrous oxide fluxes from sediments of mangrove ecosystem in Waiheru coastal area, Ambon Bay. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*. 51(11), 503 - 509.
- Komiyama, A., Pongparn, S., & Kato, S. (2005). Common allometric equation for estimating the tree weight of mangroves. *Journal of Tropical Ecology*, 21, 471 - 477. <https://doi.org/10.1017/S0266467405002476>
- Komiyama, A., Ong, J. E., & Pongparn, S. (2008). Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, 89, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.006>
- Kusmana, C., Hidayat, T., Tiryan, T., Rusdiana, O., & Istomo. (2018). Allometric models for above - and bellow - ground biomass of *Sonneratia* spp. *Global Ecology and Conservation*, 15, 1 - 13. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00417>

- Meng, Y., Bai, J., Gou, R., *et al.* (2021). Relationships between above and below ground carbon stocks in mangrove forests facilitate better estimation of total mangrove blue carbon. *Carbon Balance and Management*, 16, 8. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00172-9>
- Lilitnuhu, M. K., Kesaulya, I., & Rahman. (2024). Potensi pemanasan global emisi gas nitrous oksida (N₂O) pada kawasan mangrove Desa Poka, Kota Ambon. *Jurnal Laut Pulau*, 3(1), 10 - 18. <https://doi.org/10.30598/jlpvol3iss1pp10-18>
- Ombi, N. D. A, Rahman., & Tuahatu, J. W. (2025). Estimation of mangrove carbon standing-stock along the Coast of Kailolo Village, Central Maluku: Implications for climate change mitigation. *NEKTON*, 5(2), 92 - 103. <https://doi.org/10.47767/nekton.v5i2.1032>
- Ong, J. E., Gong, W. K., & Wong, C. H. (2004). Allometry and partitioning of the mangrove *Rhizophora apiculata*. *Forest Ecology and Management*, 188, 395 - 408. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.08.002>
- Poungparn, S., Komiyama, A., Jintana, V., Piriyayaota, S., Sangtiewan, T., Tanapermpool, P., Patanaponpaiboon, P., & Kato, S. (2002). A quantitative analysis on the root system of a mangrove, *Xylocarpus granatum* Koenig. *Tropics*, 12, 35-42. <https://doi.org/10.3759/tropics.12.35>
- Rahman., Yulianda, F., Rusmana, I., & Wardiatno Y. (2019). Production ratio of seedlings and density status of mangrove forests in coastal areas of Indonesia. *Advances in Environmental Biology*, 13(6), 13-20.
- Rahman., Wardiatno, Y., Yulianda, F., & Rusmana, I. (2020). Socio-ecological system of carbon-based mangrove ecosystem on the coast of West Muna Regency, Southeast Sulawesi-Indonesia. *AACL Bioflux*, 13(2), 518 - 528.
- Rahman., Maryono., & Sigiyo, O.N. (2023). What is the true carbon fraction of mangrove biomass? *Malaysian Journal of Science*, 42(2): 1 - 6. <https://doi.org/10.22452/mjs.vol42no2.10>
- Rahman., Ceantury, A., Tuahatu, J. W., Lokollo, F. F., Supusepa, J., Hulopi, M., Permatahati, Y. I., Lewerissa, Y. A., & Wardiatno, Y. (2024a). Mangrove ecosystems in Southeast Asia region: Mangrove extent, blue carbon potential and CO₂ emissions in 1996-2020. *Science of the Total Environment*, 915, 170051 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170051>
- Rahman., Lokollo, F. F., Supusepa, J., Natan, J., Mamesah, J. A. B., Wawo, M., Latumahina, F. (2024b). Recruitment index as a novel approach to assessing the resilience of natural mangrove ecosystems: A case study on the coast of West Muna Regency. *Asian Journal of Aquatic Research*, 26(10), 12 - 23. <https://doi.org/10.9734/ajfar/2024/v26i10814>
- Rahman., Lokollo, F. F., Manuputty, G D., Hukubun, R. D., Krisye., Wawo, M., & Wardiatno Y. (2024c). A review on the biodiversity and conservation of mangrove ecosystems in Indonesia. *Biodiversity and Conservation*, 33, 875-903. <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02767-9>
- Rahman., Lokollo, F. F., Wawo, M., Ceantury, A., Hulopi, M., Handayani, L. D., Zuhri, M. I., Effendi, H., & Wardiatno, Y. (2024d). Blue carbon potential of mangrove ecosystems and its management to promote climate change mitigation in Indonesia. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 18(2), 208 - 218. <https://doi.org/10.22146/jik.v18i2.11447>
- Rahman., Tuahatu, J. W., & Tuhehay, C. (2024e). Blue carbon potential of mangrove ecosystem on the coast of Negeri Waai, Central Maluku Regency. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 18(1), 7-15. <https://doi.org/10.22146/jik.v18i1.8814>
- Rahman., Lokollo, F. F., Wardiatno, Y., Yulianda, F., Rusmana, I., Bengen, D. G., & Berhitsu, P. T. (2025). Pengelolaan Ekosistem Mangrove dan Mitigasi Perubahan Iklim. Solok: PT. Mafy Media Literasi Indonesia, 96p.
- Sasmito, S. D., Murdiyarso, D., Friess, D. A., & Kauffman, J. B. (2020). Mangroves as a solution to the climate crisis. *Nature Climate Change*, 10(7), 558-560.
- Tamai, S., Nakasuga, T., Tabuchi, R., & Ogino, K. (1986). Standing biomass of mangrove forests in Southern Thailand. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 68(9), 384 - 388.